

Simulations numériques des performances d'une nouvelle géométrie d'éolienne à axe vertical

Jean-Luc Harion, Jean-Philippe Vermeulen & Alain Burlot

École des Mines de Douai
Département Énergétique Industrielle
941, rue Charles Bourseul, BP 10838, 59508 Douai Cedex
harion@ensm-douai.fr

(*) Incubateur APUI, École des Mines de Douai, 941, rue Charles Bourseul, BP 10838, 59508 Douai Cedex

Résumé :

Une nouvelle géométrie de rotor éolien à axe vertical a été proposée. Cette communication présente des simulations numériques réalisées sur cette nouvelle géométrie afin d'en évaluer les performances. Une première série de simulations bidimensionnelles a été réalisée dans le plan horizontal médian de l'éolienne. Ces simulations, réalisées à l'aide d'un maillage tournant, ont permis de tester l'influence du maillage, différents modèles de turbulence, ainsi que différentes géométries de pales. Une simulation tridimensionnelle, incluant un maillage tournant, a ensuite été réalisée pour quantifier les performances de la géométrie en termes de couple et de coefficient de puissance.

Abstract :

A new vertical axis wind turbine geometry was proposed. This communication presents numerical simulations performed in order to evaluate the performances of this new geometry. Initially, two-dimensional simulations were realized in the median horizontal plan. These simulations, carried out using a moving mesh, aimed to test the influence of the mesh, various turbulence models, and various blade geometries. A three-dimensional simulation, including a moving mesh, was then carried out to quantify the performances of the geometry in terms of moments and power coefficient.

Mots-clefs :

Eolien ; Eolienne à axe vertical ; Simulations numériques ; Aérodynamique

1 Introduction

Parmi les sources potentielles d'énergies renouvelables, l'éolien représente une part importante. L'énergie éolienne, si elle ne peut pas compenser ou remplacer les sources traditionnelles d'énergies fossiles, constitue cependant une voie intéressante de réduction des émissions de CO_2 . Le développement de l'énergie éolienne s'est très nettement accéléré depuis une douzaine d'années. Par voie de conséquence, le coût du kilowattheure éolien a progressivement baissé et la fiabilité des machines s'est améliorée. Les développements réalisés depuis une dizaine d'années portent principalement sur l'accroissement des échelles et des productions unitaires des éoliennes à axe horizontal. Les plus grandes machines atteignent actuellement des puissances unitaires de production de 5 MW.

Depuis quelques années se développent parallèlement des technologies visant plus particulièrement de petites ou moyennes puissances. L'essentiel de ces nouveaux développements portent sur les rotors à axes verticaux. Ces machines (classiquement d'inspiration Savonius ou Darrieus) sont, de par leur très faibles émissions sonores, leur insensibilité à la direction du vent

et leur démarrage à faible vitesse (notamment du rotor Savonius), particulièrement bien adaptées par exemple à l'habitat individuel ou collectif (Menet et Leiper (2005); Saha et Rajkumar (2006)).

Une nouvelle géométrie d'éolienne à axe verticale a été proposée (Burlot, 2004). Cette éolienne est composée de trois pales régulièrement réparties à 120° autour de l'axe vertical (voir figure 1). Chaque pale, dont le profil de base est un profil NACA0015 symétrique, est composée d'une partie semi-circulaire, d'une partie horizontale supérieure et d'une partie horizontale inférieure. Chaque pale est directement fixée au palier de rotation au niveau de la partie inférieure de la pale. La partie supérieure de la pale est reliée à l'axe par l'intermédiaire d'un bras (figure 1(a)). Ce bras de liaison, ainsi que la jonction entre la partie basse et le palier ne sont pas intégrés à la géométrie simulée (figure 1(b)).

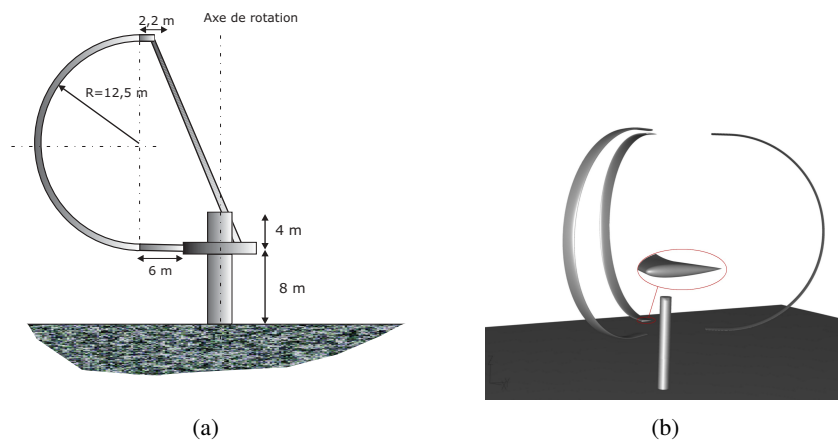


FIG. 1 – Schéma de l'éolienne à axe verticale simulée

2 Simulations bidimensionnelles

Une première phase de l'étude a porté sur des simulations bidimensionnelles dans le plan horizontal médian de l'éolienne. Le domaine de calcul est schématisé sur la figure 2 et inclue un maillage tournant entourant les pales de l'éolienne réalisés à l'aide du logiciel GAMBIT 2.2.30. Une attention particulière a été portée au maillage autour des pales. C'est un maillage de type couche limite dont la hauteur de première maille a été fixée à 1 mm . Une étude de sensibilité a montré que pour une hauteur de première maille inférieure, les résultats n'évoluent pas de façon significative.

Les calculs sont réalisés en utilisant le logiciel FLUENT 6.2. Différents modèles de turbulence disponibles dans FLUENT ont été testés. Le modèle retenu pour des simulations, ainsi que pour les calculs tridimensionnels est le $k - \epsilon$ *realizable* associé aux options de calcul *Enhanced Wall Treatment* et *Pressure Gradients Effects*.

La vitesse de l'air est fixée uniformément sur l'entrée à $U = 10\text{ m/s}$. La vitesse de rotation du maillage tournant, c-à-d des pales, est fixée à $\omega = 20\text{ tr/mn}$, soit $2,09\text{ rd/s}$. Ces deux valeurs correspondent, en terme de régime de fonctionnement de l'éolienne, à un paramètre $\lambda = \frac{R\omega}{U} \approx 4,2$, R étant le rayon de l'éolienne dans le plan médian. Le pas de temps a été pris constant et égal à $0,01\text{ s}$.

Différentes géométries de pales ont été testées en conservant un corde égale à $1,6\text{ m}$.

Ces calculs ont permis de déterminer, parmi les configurations testées, la géométrie la plus performante. Les meilleurs résultats ont été obtenus pour un profil symétrique NACA0015.

Ainsi, les calculs tridimensionnels ont été réalisés en conservant ce profil de pale.

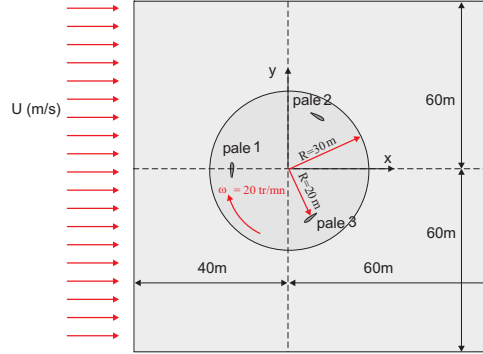


FIG. 2 – Configuration bidimensionnelle de calcul, plan médian, maillage tournant

3 Simulations tridimensionnelles

La configuration tridimensionnelle est présentée sur les figures 3(a) à 3(c). Le domaine de calcul considéré (voir figure 3(b)) s'étend, pour un repère centré au pied de l'éolienne, longitudinalement de -50 à 90 m, transversalement de -60 à 60 m et verticalement de 0 à 50 m (la hauteur de l'éolienne simulée valant 33 m). Les bras de maintien des pales, ainsi que la jonction avec le mat ont été supprimés pour simplifier le maillage, sans toutefois altérer de façon significative la dynamique de l'écoulement, ni le couple résultant sur les pales.

Chaque pale est dissociée en six tronçons contigus (voir figure 3(c)), correspondant à l'identification de six conditions limites de type *wall* par pale. Ceci permet une analyse plus fine des résultats de couple et d'efforts calculés.

Autour des pales, des maillages hexaédriques de type couche limite sont définis avec une hauteur de première maille égale à 1 mm, comme pour les calculs bidimensionnels. Le domaine fixe est maillé par des cellules hexaédriques, le domaine tournant, à l'exception de la proximité des pales, est constitué de mailles tétraédriques (voir figure 4). Au total, le domaine compte 5048374 mailles.

En entrée du domaine de calcul, un profil de vitesse caractéristique d'une couche limite atmosphérique, est imposé (voir figure 5) :

$$U(z) = U_{ref} \frac{\log\left(\frac{z+z_0}{z_0}\right)}{\log\left(\frac{z_{ref}+z_0}{z_0}\right)} \quad (1)$$

z est l'altitude du point considéré, z_0 un paramètre de rugosité équivalente ($z_0 = 0,005$ m), z_{ref} l'altitude du point pour lequel est appliquée la vitesse U_{ref} ($z_{ref} = 20,5$ m : plan médian). U_{ref} est la vitesse à l'altitude z_{ref} ($U_{ref} = 10$ m/s).

La vitesse de rotation de la partie mobile du maillage a été fixée à $\omega = 20$ tr/mn soit $2,09$ rad/s suivant l'axe vertical selon le sens trigonométrique. Comme pour les simulations bidimensionnelles, le paramètre λ de régime de fonctionnement de l'éolienne vaut environ $4,2$. Les schémas de discrétisation utilisés sont de second ordre amont. Le pas de temps a été pris constant et égal à $0,01$ s. Un tour complet de l'éolienne est ainsi décomposé en 300 pas de temps successifs.

Les résultats présentés dans cette communication sont issus de la quatrième période de rotation de l'éolienne après stabilisation des calculs durant les trois premières périodes.

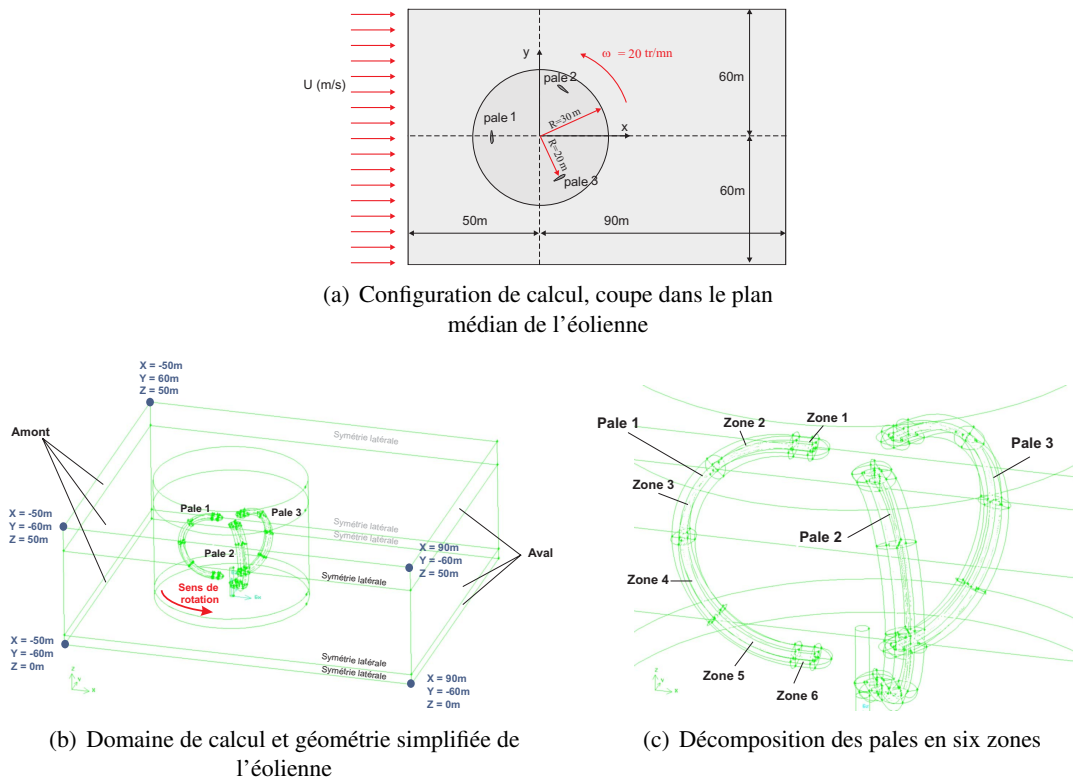


FIG. 3 – Schémas de la configuration de calcul tridimensionnel

La figure 6 présente l'évolution du moment calculé sur la pale 1 en fonction de sa position angulaire durant la quatrième période de rotation ($9 \leq t < 12$ s). La pale est motrice (moment positif dans la configuration simulée) durant la très large majorité du temps. Seuls les positions autour des angles de 90° et 270° , respectivement dans les intervalles $[79, 2^\circ, 109, 2^\circ]$ et $[254, 4^\circ, 304, 8^\circ]$. Ces phases correspondent à des écoulements pour lesquels l'angle d'incidence entre le vent et la vitesse d'entraînement de la pale (≈ 42 m/s) est très faible. Le moment calculé est alors quasi-exclusivement lié à la traînée visqueuse, qui engendre par nature un moment résistant. Ce moment résistant est plus important autour de 270° car dans cette zone, la vitesse absolue à laquelle est exposée la pale vaut $U(z) + \omega R$, soit environ 52 m/s, alors qu'elle vaut $U(z) - \omega R$ dans la zone autour de 90° .

La figure 7 décompose les contributions des différentes zones (1 à 6) au moment calculé sur la pale 1. Les zones 1 et 6, correspondant à des portions de pale horizontales, ne sont à aucun moment en incidence et ne sont soumises qu'à des traînées purement visqueuses. Le moment résultant est faible et négatif.

Les zones contribuant le plus significativement au couple moteur global de l'éolienne sont les zones 3 et 4. Ces zones correspondent d'une part aux parties les plus éloignées de l'axe de rotation. Elle présentent d'autre part, étant proches d'une situation verticale, les angles d'incidences entre la vitesse absolue et la vitesse d'entraînement ωR les plus élevés. La zone 3 produit des couples plus élevés que la zone 4. Ceci est dû, par le profil de vitesse imposé en entrée de calcul, à une vitesse de vent plus importante pour la zone 3 que pour la zone 4 située dans la partie basse. Les zones 2 et 5 contribuent de manière très sensiblement moindre au couple moteur. Ces zones sont en effet plus proches de l'axe de rotation et leur inclinaison par rapport à l'axe vertical entraîne des angles faibles de mises en incidences pendant la période de rotation, ce qui se traduit par des moments moteurs moindres.

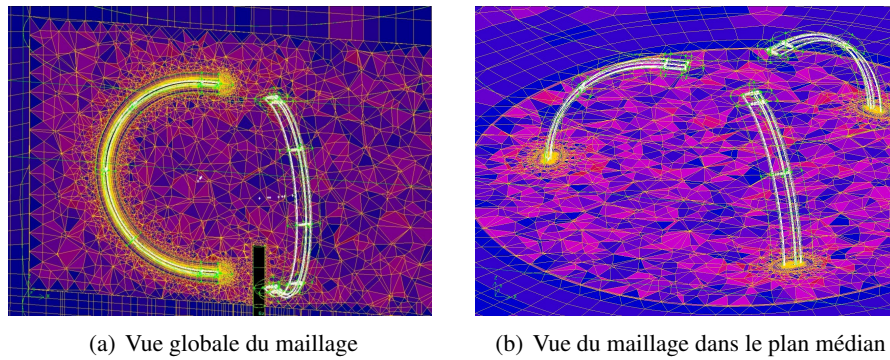


FIG. 4 – Éléments de maillage du domaine de calcul

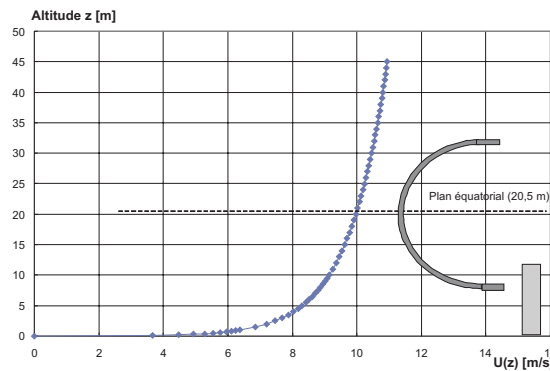


FIG. 5 – Profil de vitesse de vent imposé en entrée de domaine de calcul

En terme de performance globale, le moment global cumulant les moments calculés sur les trois pales est présenté sur la figure 8. Un point important à noter est que, bien que chaque pale soit soumise localement à des phases de couple résistant, le couple global de l'éolienne est très nettement positif, c-à-d. moteur, durant toute la période de révolution. Le couple moyen, calculé sur l'ensemble de la période, vaut 90150 Nm , ce qui correspond, pour la vitesse de rotation simulée, à une puissance de $188,4 \text{ kW}$. Le coefficient de puissance donné par :

$$C_p = \frac{M \omega}{\frac{1}{2} \rho S_{\text{frontale}} U^3} \quad (2)$$

vaut alors environ 0,36, en considérant une surface balayée $S_{\text{frontale}} = 866 \text{ m}^2$.

4 Conclusions

Ces deux études numériques de la nouvelle géométrie d'éolienne proposée ont permis de définir le profil de pale le mieux adapté et de quantifier la puissance motrice fournie par ce rotor. Le calcul tridimensionnel a permis d'évaluer les efforts aérodynamiques appliqués sur les pales ainsi que leurs évolutions temporelles.

Références

- Burlot A. . Eolienne à axe vertical, 2004. Brevet n° 0412262, date de Dépôt 18 novembre 2004.
Menet J-L. et Leiper A. . Prévion des performances aérodynamiques d'un nouveau type

d'éolienne à axe vertical dérivée d'un rotor Savonius. 17^{ème} Congrès Français de Mécanique, Troyes, 2005.

Saha U.K. et Rajkumar M. Jaya . On the performance analysis of Savonius rotor with twisted blades. *Renewable Energy*, 31 :1776–1788, 2006.

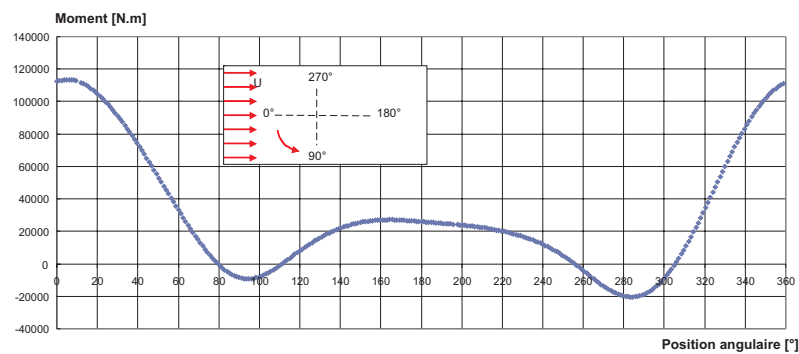


FIG. 6 – Évolution du moment calculé sur la pale 1 en fonction de sa position angulaire (1 tour)

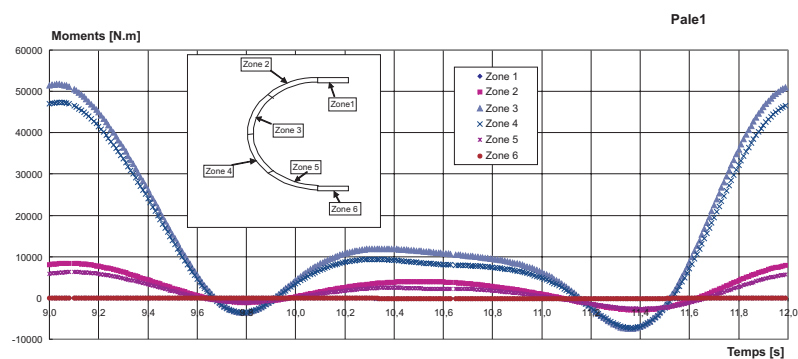


FIG. 7 – Moments calculés sur les six zones de la pale 1 en fonction du temps (1 tour)

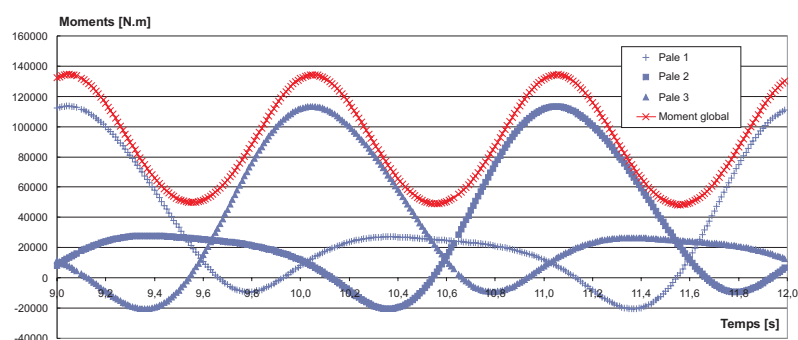


FIG. 8 – Moment global calculé